

# Influencia de los costes energéticos y ambientales en el periodo óptimo de renovación de una tubería

Pardo Picazo, Miguel A., Cabrera Marcet, Enrique, Cobacho Jordán, Ricardo y Cabrera Rochera, Enrique

ITA, Universidad Politécnica de Valencia, miparpi@ita.upv.es

## Introducción

El periodo de renovación de una tubería suele calcularse minimizando la suma de los costes de renovación y mantenimiento. Numerosos estudios han tratado este asunto destacando por su posterior impacto el trabajo de Shamir y Howard (1979). Admitiendo un aumento exponencial de roturas en el tiempo, obtienen el periodo óptimo calculando el valor mínimo de la suma de los costes de renovación y de reparación. Cabrera y col. (2007) proponen la generalización de este proceder incluyendo los costes del agua fugada, considerando tanto su coste intrínseco de producción y transporte como el medioambiental (entendido éste como el coste que se paga por la detracción del recurso del medio natural) y social. El coste del agua fugada incluye también el de la energía a ella asociada. Esta nueva formulación se integra mejor en el actual escenario de mayor sensibilización medioambiental y con el objetivo claro de propiciar el uso eficiente de los recursos fundamentales, el agua y la energía.

El estudio determina la influencia de los costes energéticos y de los ambientales en el periodo óptimo de renovación, constatándose la importancia de su consideración. Los energéticos ya están en España plenamente vigentes. No así los medioambientales que si incluyen los países Europeos con una superior sensibilidad ambiental. La conclusión final es que, si se eliminan los subsidios que aún hoy tiene el precio del agua, las políticas de mantenimiento de estas infraestructuras se van a ver notablemente potenciadas. Y es que, dicho de una manera directa y coloquial, el uso sostenible del agua tiene un precio.

## Planteamiento del problema

Los dos costes habitualmente incluidos, Shamir y Howard (1979), se comportan de modo diferente. La renovación de la tubería es una inversión cuyo valor en dinero del año del estudio en curso decrece en el tiempo por la tasa de actualización real, mientras la reparación, acumulada año a año, es creciente. Pues bien, los nuevos costes muestran uno de estos dos comportamientos. Los costes sociales se tratan como si de una inversión se tratase ya que únicamente interviene al renovar la tubería, mientras que los costes variables del agua se comportan como los de mantenimiento de la red, ya que son acumulativos desde el instante actual hasta en el que se produce la renovación.

El coste de reparación y mantenimiento,  $C_2$ , es sensible a la edad de la tubería y se refleja con al aumento temporal de las roturas. El coste del agua fugada  $C_{31}$  y el incremento del consumo energético  $C_{32}$  sólo dependen del número de roturas de la tubería creciente con el paso del tiempo. Finalmente el coste social  $C_4$  es el que, en síntesis, valora los perjuicios derivados de la instalación.

## Revisión de la estructura de costes

La determinación del periodo óptimo de renovación exige cuantificar la evolución en el tiempo de todos los costes. En el análisis que sigue todos esos costes se expresan en unidades monetarias del año actual y están referidos a la unidad de longitud de la conducción. Por ello el conjunto de tuberías que se considera debe ser homogéneo en diámetro, material y montaje.

Este apartado define los costes considerados en este trabajo y como han sido evaluados. Para comprender éstos, se ha de definir ciertos instantes de tiempo:

- $t_0$ , que es el año a partir del cual se dispone de datos de las roturas en conducciones,
- $t_p$ , año actual,
- $t_r$ , año en el que se realiza la primera renovación

### Coste de renovación ( $C_1$ )

El coste de renovación de las tuberías, es:

$$C_1(t_p) = C_{r1} \cdot e^{-r \cdot t_p}$$

Con:  $C_{r1}$  coste de renovación de la tubería  $i$  expresado en €/m en el año actual  
 $\frac{C_{r1}}{T_i}$  es la diferencia entre el año actual y el año en el que la tubería será reemplazada  
 $r$  la tasa continua de actualización equivalente del coste en tanto por uno

### Coste de reparación y mantenimiento ( $C_2$ )

Si se desea determinar el coste de la reparación de las roturas que afectan a una tubería, se debe comenzar conociendo la evolución temporal de las roturas por unidad de longitud y tiempo.

$$N(t)_i = N(t_0)_i \cdot \exp(A_i \cdot (t - t_0))$$

Con:  $N(t)_i$  roturas de la conducción  $i$  para el año  $t$  y unidad de longitud  
 $N(t_0)_i$  roturas de la conducción  $i$  para el año  $t_0$  (año en el que se comenzó a recoger datos)  
 $A_i$  coeficiente de crecimiento del número de roturas en la tubería  $i$  expresado en (años<sup>-1</sup>).

El coste total de la reparación de la conducción desde el año en curso hasta el año correspondiente a la reposición de la tubería (€ del año  $t_p$ ) es:

$$C_2(t_p) = \int_0^{T_i} C_{b1} \cdot N(t_0)_i \cdot \exp(A_i \cdot (t - t_0)) \cdot e^{-r \cdot t} \cdot dt$$

Con:  $C_{b1}$  Coste de reparación de una rotura

### Costes variables del agua ( $C_3$ )

Costes variables relacionados con las pérdidas de agua

$$C_{31}(t_p) = \Delta t_{a1} \cdot C_{W1} \cdot \int_0^{T_i} q_{f1} \cdot N(t_0)_i \cdot \exp(A_i \cdot (t - t_0)) \cdot e^{-r \cdot t} \cdot dt$$

Con:  $C_{W1}$  coste del agua €/m<sup>3</sup> del presente año acumulado desde  $t_0$  hasta el año  $t_p$   
 $q_{f1}$  caudal medio unitario por fuga  
 $\Delta t_{a1}$  tiempo medio de actividad de la fuga

### Coste asociado a las pérdidas de energía

El peaje energético de las fugas en una red de distribución se compone de dos términos, la energía directamente ligada a las fugas,  $C_{32a}$ , y las pérdidas por fricción extras debido al exceso de caudal circulante debido a las fugas,  $C_{32b}$ .

$$C_{32a}(t_p) = \Delta t_{a1} \cdot C_{WE1} \cdot \int_0^{T_i} q_{f1} \cdot N(t_0)_i \cdot \exp(A_i \cdot (t - t_0)) \cdot e^{-r \cdot t} \cdot dt$$

Con:  $C_{WE1}$  Coste energético del agua (€/m<sup>3</sup>)

$$C_{32b}(t_p) = \frac{k \cdot \gamma}{\eta} \cdot C_E \cdot \int_0^{T_i} q_{f1} \cdot \Delta t_{a1} \cdot \frac{P_{s1}}{\gamma} \cdot N(t_0)_i \cdot \exp(A_i \cdot (t - t_0)) \cdot e^{-r \cdot t} \cdot dt$$

Con:  $\frac{P_{s1}}{\gamma}$  Presión media a la que se produce la fuga  
 $C_E$  Coste de la energía consumida (€/Kwh)  
 $\eta$  Rendimiento en tanto por uno de los grupos de bombeo  
 $k$  Coeficiente que cuantifica el aumento de la presión de cabecera y el aumento de caudales derivados de la existencia de las fugas ( $k > 1$ ).

### Coste social asociado a la perturbación por obras ( $C_4$ )

El término coste social evalúa los perjuicios y molestias que una obra genera a la población y al entorno. Se expresa en € del años presente como:

$$C_4(t_p) = C_{S1} \cdot e^{-r \cdot T_{\eta}}$$

Con  $C_{S1}$  coste de las molestias y perturbaciones originadas en la ejecución de la obra

## Obtención del periodo óptimo de renovación

$$C_T(t_p) \equiv C_1(t_p) + C_2(t_p) + C_{31}(t_p) + C_{32a}(t_p) + C_{32b}(t_p) + C_4(t_p)$$

Y la optimización del problema se logra minimizando estos costes totales, según Cabrera y col (2007) como:

$$t^* = t_0 + \frac{1}{A_i} \ln \left( \frac{r \cdot I_i}{M_i \cdot N(t_0)_i} \right)$$

Donde:

$$M_i = C_{b1} + \left( q_{f1} \cdot \Delta t_{a1} \cdot \left( C_W + C_{WE} + \frac{k \cdot P_{s1}}{\eta} \cdot C_E \right) \right)$$

$$I_i = C_1 + C_{S1}$$

### Mantenimiento:

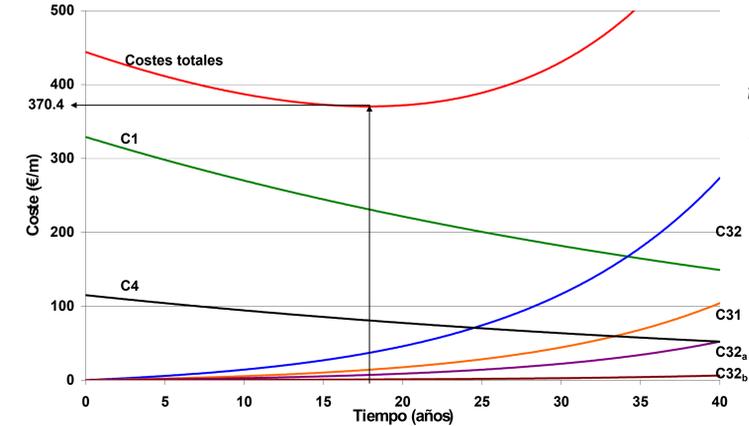
engloba los costes de reparación y los costes variables del agua

### Inversión:

Considera los costes de renovación y social

## Ejemplo Numérico

- $C_{r1} = 329.1$  (€/m)
- $C_{b1} = 1680$  €
- $N(t_0)_i = 55$  roturas/100km/año
- $A_i = 0.1$  años<sup>-1</sup>
- $C_W = 0.2$  (€/m<sup>3</sup>)
- $C_{WE} = 0.1$  (€/m<sup>3</sup>)
- $q_{f1} = 20$  (m<sup>3</sup>/día)
- $\Delta t_{a1} = 160$  (días)
- $\frac{P_{s1}}{\gamma} = 25$  (m.c.a.)
- $C_E = 0.1$  (€/Kwh)
- $\eta = 0.8$
- $k = 1.4$
- $C_{S1} = 115$  (€/m)



Con la expresión analítica definida se obtiene que el periodo óptimo de renovación es:

$$t^* = 0 + \frac{1}{0.1} \ln \left( \frac{0.0198 \cdot 444.1}{2679.43 \cdot 0.00055} \right) = 17.9 \text{ años}$$

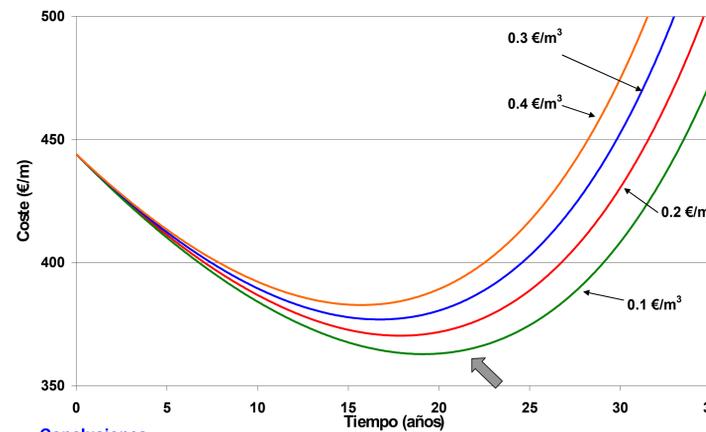
Y el coste mínimo:

$$C_T(t_p) = 370.4 \text{ €/m}$$

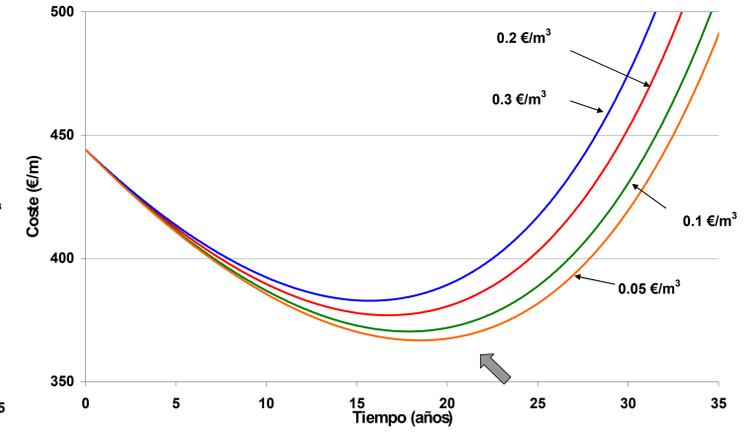
Costes habituales

Costes nuevos

## Influencia del coste del Agua



## Influencia del coste de la Energía



## Conclusiones

El análisis precedente depara pocas sorpresas. Cuando los costes del agua y de la energía aumentan sustancialmente en el tiempo el periodo óptimo de reposición se anticipa, tanto más cuanto mayores sean. El nivel de fugas de la red influye en el periodo óptimo de renovación, aunque no tanto debido a la energía extra consumida en red, sino sobre todo por el coste del agua y la energía perdidas en roturas. Así lo evidencia lo expuesto en los apartados 5.2 y 5.3. La presente metodología permite cuantificar la dependencia de los principales parámetros que condicionan las decisiones.

Los costes energéticos del agua cobran especial relevancia en los abastecimientos donde el origen del mismo requiere un elevado consumo energético, concretamente para redes alimentadas con agua desalada, en valores que ser de 0.6 €/m<sup>3</sup>, como es el caso de la nueva desaladora de El Prat en Barcelona, o aguas subterráneas muy profundas (0.15-0.2 €/m<sup>3</sup>).

La implantación de costes ambientales del agua, en España en ningún caso se repercuten, propicia que los niveles de fuga hoy existentes en numerosos abastecimientos españoles sean inaceptables. La necesidad de gestionar el agua de manera eficiente propiciará que, de manera progresiva, se vayan implantando.

## Referencias

- Cabrera, E. Pardo, M.A., Cabrera jr, E and Cobacho, R. (2007) Optimal scheduling of pipe's replacement, including opportunity, social and environmental costs Pipelines 2007. American Society of civil Engineers – ASCE. Boston. USA.

- Shamir, U., and Howard, C. D. D. (1979) Analytical approach to scheduling pipe replacement Journal AWWA, 71(5), 248-258